

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálového inženýrství



Bakalářská práce

ISM proces aplikovaný v technologii titanových slitin,
technologické aspekty, producenti

Zadání bakalářské práce

Student: **Ing. Ladislav Fuglíček**
Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství
Studijní obor: 3911R036 Progresivní technické materiály
Téma: ISM proces aplikovaný v technologii titanových slitin, technologické aspekty, producenti
ISM process applied in titanium alloys technology, technological aspects, producers
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Problematika slitin Ti, rozdělení
3. Způsoby přípravy Ti slitin, metody
4. ISM proces
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


1. KURSA, M. Intermetalické sloučeniny Ti-Al a slitiny na jejich bázi. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2005. ISBN 8024808935.
2. LEYENS, Ch, PETERS, M. Titanium and titanium alloys. WILEY – VCH, Weinheim, 2003, p. 513.
3. DONACHIE, Matthew J. Titanium: a technical guide. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2000. ISBN 0-87170-686-5.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

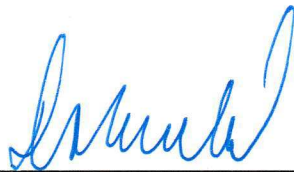
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ivo Szurman, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018


prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.
Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.
- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

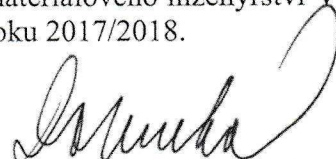
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 27.4.2018

Ing. Ladislav Fuglier
podpis (jméno a příjmení studenta)

Abstrakt

V této bakalářské práci jsou shromážděny informace o prvku titan a principu tavení titanu ve studeném kelímku (ISM). Práce je rozdělena do čtyř hlavních kapitol. První část se zabývá prvkem titan, kde jsou popsány základní vlastnosti tohoto prvku a rozdělení druhů slitin titanu. Druhá část se zaměřuje na způsoby výroby titanu. Ve třetí části je rozebrán proces ISM, který je zde popsán, a jsou zde navržena možná konstrukční řešení tohoto procesu. Čtvrtá část je zaměřena na producenty, titanové slitiny v praxi a zhodnocení procesu ISM, ve kterém jsou porovnávány výhody a nevýhody použití tohoto procesu. Závěrem bylo provedeno celkové zhodnocení získaných poznatků.

Klíčová slova: slitiny titanu, výroba titanu, proces ISM.

Abstract

In this bachelor thesis, information is collected on the titanium element and the principle of melting in the cold crucible titanium (ISM). The thesis is divided into four main chapters. The first part deals with the titanium element, which describes the basic properties of this element and the distribution of types of titanium alloys. The second part focuses on methods of titanium production. In the third part, the ISM process is discussed, and there is proposed a possible design solution for this process. The fourth part is focused on producers, titanium alloys in practice and ISM process evaluation, which compares the advantages and disadvantages of using this process. In conclusion, an overall assessment of the acquired knowledge was made.

Key words: titanium alloys, titanium production, ISM process

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval především vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ivu Szurmanovi PhD. za cenné profesionální rady, připomínky a konzultace při zpracování bakalářské práce.

Obsah

Obsah.....	11
1. Úvod	13
1.1 Výskyt titanu v přírodě	13
1.2 Vlastnosti titanu	13
2. Problematika slitin Ti, rozdělení	15
2.1 Slitiny titanu	15
2.1.1 Slitiny α	17
2.1.2 Slitiny pseudo α	17
2.1.3 Slitina $\alpha + \beta$	17
2.1.4 Slitiny β a pseudo β	18
2.1.5 Žáropevné pseudoslitiny titanu	18
2.1.6 Materiály s tvarovou pamětí	19
3. Způsoby výroby Ti	19
3.1 Výroba Ti Krollovým procesem	19
3.2 FFC proces, perspektiva výroby titanu	21
3.3 Rafinace titanu	21
4. ISM	23
4.1 Tavení titanu	23
4.2 Princip tavení ve studeném kelímku	24
4.3 Princip indukčního ohřevu	25
4.4 Konstrukční provedení kelímku	26
4.4.1 Kelímek jako cívka	26
4.4.2 Kelímek tvořený segmenty	28
4.5 Energetická bilance procesu ISM	30
4.6 Ztráty vzniklé při procesu ISM	31
4.6.1 Ztráty příkonu a tepelné ztráty	31

4.6.2 Ztráty v cívce	32
4.6.3 Ztráty v kelímku.....	33
5. Producenti titanu metodou ISM	33
6. Slitiny titanu v praxi.....	34
6.1 α slitiny	34
6.2 Slitiny pseudo α	34
6.3 Slitiny $\alpha + \beta$	34
6.4 Slitiny β a pseudo β	35
7. Zhodnocení procesu tavby pomocí procesu ISM	35
7.1 Výhody ISM	35
7.2 Nevýhody ISM	36
8. Závěr.....	37
9. Použitá literatura:	38

1. Úvod

1.1 Výskyt titanu v přírodě

Titan objevil britský amatérský geolog pastor William Gregor v roce 1791, nový prvek pojmenoval v roce 1795 německý profesor chemie Martin Heinrich Klaproth. Surový titan připravili švédští chemici Lars Nilson a Sven Pettersson v roce 1887, v čisté formě získal kovový titan až v roce 1910 Matthew Hunter redukcí chloridu titaničitého sodíkem [1].

Průměrný obsah titanu v zemské kůře činí 0,61 %, jedná se o desátý nejrozšířenější prvek periodické soustavy. Přírodní titan je směsí pěti stabilních izotopů. Nejrozšířenější je izotop ^{48}Ti s podílem 73,8 %. Jadernými reakcemi bylo připraveno 13 radioaktivních izotopů titanu.

V přírodě se titan vyskytuje značně rozptýlen, bývá obsažen téměř v každé půdě. V rozporu s polohou v elektrochemické řadě napětí se velmi vzácně vyskytuje také ryzí titan. Ryzí titan, ve formě dvou vloček o rozměrech $1,2 \times 0,8$ mm, byl poprvé nalezen s ryzím cínem, olovem a mědí ve východním Jakutsku v Rusku.

Z minerálů má nejvyšší obsah titanu (77,37% Ti) osbornit TiN , hongquiit TiO obsahuje 74,95% Ti. Celkem bylo mineralogicky popsáno více než 430 nerostů s obsahem titanu, např. tistarit Ti_2O_3 , geikielit MgTiO_3 , srilankit $(\text{Ti},\text{Zr})\text{O}_2$, pyrofanit MnTiO_3 , tausonit SrTiO_3 nebo loparit $(\text{Ce},\text{La},\text{Na},\text{Ca},\text{Sr})(\text{Ti},\text{Nb})\text{O}_3$.

Nejdůležitější rudy titanu jsou **ilmenit** FeTiO_3 (pokrývá 92 % spotřeby), **rutil** (anatas, brookit) TiO_2 , **perovskit** CaTiO_3 a **titanit** CaTiSiO_5 [2,3].

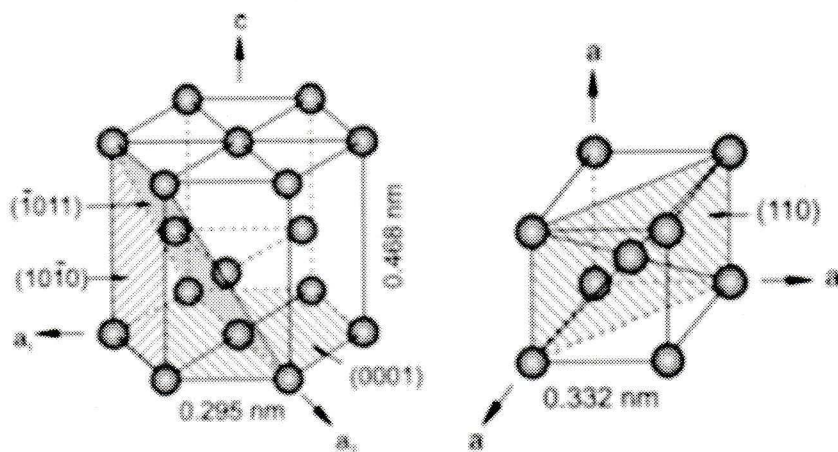
1.2 Vlastnosti titanu

Chemický prvek titan je kov ocelového vzhledu, velmi tvrdý a křehký. (obr. 1)



Obr. 1 Titan [4]

Je to polymorfní kov s vysokou teplotou tání, většinou se používá ve formě slitin. Titan jako čistý kov má mřížku HTU (obr. 2). Teplota alotropické přeměny je 882 °C [4].

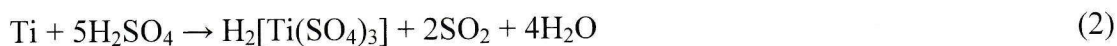


Obr. 2 Krystalografické mřížky pro alfa (HTU) a beta (KSC) fázi [5]

Na vzduchu je titan stálý, s fluorem reaguje při 150 °C za vzniku fluoridu titaničitěho TiF_4 , s chlorem reaguje za vzniku chloridu titaničitěho TiCl_4 až při teplotě 300 °C, s ostatními nekovy se slučuje až za mnohem vyšších teplot. Má značnou afinitu k uhlíku a křemíku a snadno se slučuje na karbid TiC a silicid TiSi_2 , s dusíkem reaguje za vzniku nitridu TiN . Dobře rozpustný je v kyselině fluorovodíkové HF za vzniku komplexní kyseliny hexafluorotitaničité:



Pomalu reaguje se zředěnými horkými roztoky HCl a HBr za vzniku typicky světlefialově zbarveného komplexu hexaaquatitanitěho $[\text{Ti}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$. S kyselinou sírovou titan reaguje za vzniku komplexní kyseliny trisulfatotitaničité:



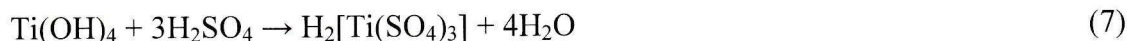
S kyslíkem tvoří oxid titanitý Ti_2O_3 a titaničitý TiO_2 . Hydroxid titanitý $\text{Ti}(\text{OH})_3$ je slabá zásada a reaguje s kyselinami za vzniku titanité soli:



Naproti tomu hydroxid titaničitý $\text{Ti}(\text{OH})_4$ je výrazně amfoterní, s hydroxidy alkalických kovů reaguje za vzniku alkalických hexahydroxytitaničitanů:

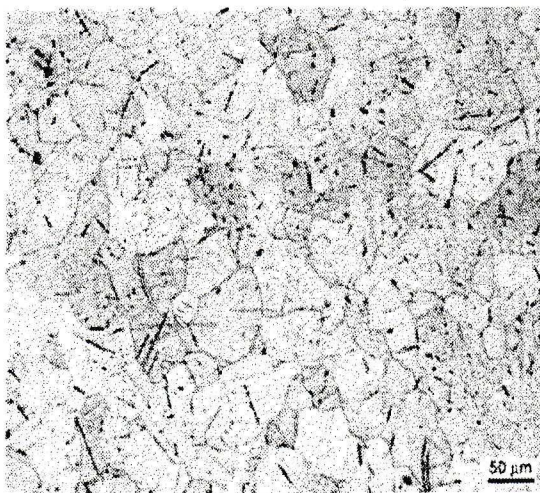


S kyselinami reaguje za vzniku solí titanylu, s nadbytkem kyseliny tvoří komplexní kyselinu disulfatotitanylu nebo kyselinu trisulfatotitaničitou:



Patří mezi neušlechtilé kovy a snadno vytěsňuje ušlechtilé kovy z jejich solí. Titan má značný sklon k tvorbě komplexních sloučenin, ve kterých vystupuje obvykle s koordinačním číslem 6, méně často 4. Ve sloučeninách se titan vyskytuje nejčastěji jako čtyřmocný, sloučeniny trojmocného titanu jsou podstatně méně rozšířené, sloučenin dvoumocného titanu existuje pouze několik, např. oxid titanatý TiO a nestabilní halogenidy TiCl_2 , TiBr_2 , TiI_2 . Sloučeniny titanu v oxidačních stavech +II a +III bývají obvykle zbarvené fialově či zeleně, sloučeniny čtyřmocného titanu jsou většinou bílé či bezbarvé.

Titan s vysokou čistotou má pevnost v tahu R_m až 250 MPa, tažnost až 60 %. Příměsí pevnost zvyšují až na 550 MPa, tažnost však současně klesá až na 20 %. Struktura čistého titanu α je na obr. 3 [1,5,6].



Obr. 3 Struktura čistého titanu α [7]

2. Problematika slitin Ti, rozdělení

2.1 Slitiny titanu

Titan má dvě alotropické modifikace:

- Ti α s mřížkou HTU, stabilní do 882,5 °C,
- Ti β s mřížkou KSC, stabilní od 882,5 °C.

Přísadové prvky se v obou modifikacích titanu rozpouštějí úplně nebo částečně a tvoří roztoky α a β , které mají zachování mřížku dané modifikace titanu. Některé prvky se navíc s titanem slučují a tvoří intermetalické sloučeniny. Podobně jako v ocelích mohou ve slitinách

titanu existovat při nerovnovážných podmínkách fázových přeměn metastabilní fáze martenzitického typu.

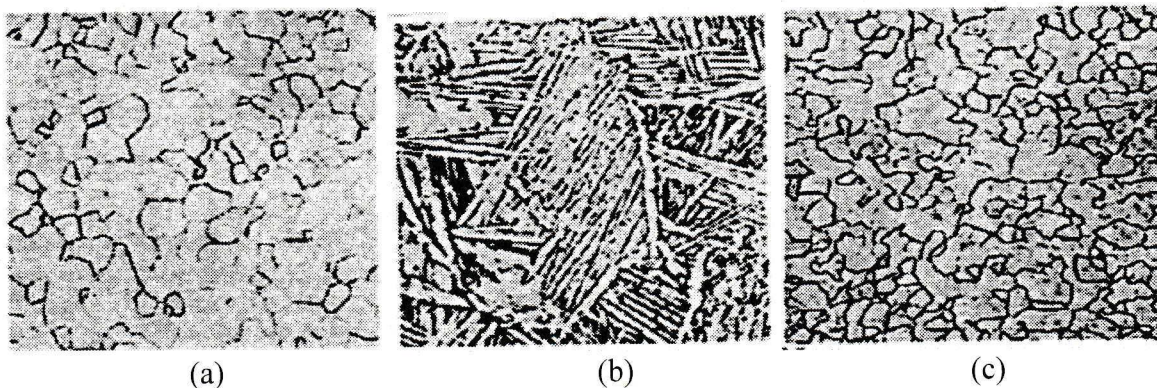
Rozdělení přísadových prvků:

- α stabilizátory (Al, O, N, C) teplotu fázové přeměny $\alpha \rightleftharpoons \beta$ zvyšují, tedy stabilizují tuhý roztok α . Nekovy O, N a C jsou nečistoty, jejichž obsah je třeba udržet minimální, protože i jejich velmi malé množství značně zvyšuje tvrdost a křehkost slitin. Praktický význam jako α stabilizátor má proto pouze hliník. Je použit téměř ve všech průmyslově vyráběných slitinách titanu.
- β stabilizátory teplotu fázové přeměny $\alpha \rightleftharpoons \beta$ snižují, tj. stabilizují tuhý roztok β . Při dostatečně vysokém obsahu těchto prvků tuhý roztok β zůstává zachován až do normální teploty jako fáze stabilní (V, Nb, Mo, Ta) nebo se tuhý roztok β při nízké teplotě rozpadá eutektoidní přeměnou (Cu, Si, Cr, Mn, Fe, Co, Ni)
- neutrální prvky (Sn, Zr) na teplotu fázové přeměny $\alpha \rightleftharpoons \beta$ nemají vliv

Podle konečné struktury, vytvořené při pomalém ochlazování z teploty žíhání, se slitiny titanu dělí na:

- slitiny α
- slitiny pseudo α (obsahují max. 6 hm. % fáze β)
- slitiny $\alpha + \beta$
- slitiny pseudo β (obsahují malá množství fáze α)
- slitiny β

Na následujícím obrázku jsou uvedeny mikrostruktury základních slitin [7,8].



Obr. 4 Příklady mikrostruktur slitin: a) alfa (Ti-Al5-Sn2,5); b) alfa + beta (Ti-Al6-V4) c) beta (Ti-V13-Cr11-Al) [7]

2.1.1 Slitiny α

Kromě α stabilizátoru hliníku a cínu, které stabilizují α oblast tyto slitiny obvykle obsahují i neutrálně působící cín a zirkonium. Tyto slitiny mají lepší odolnost proti tečení než β slitiny a proto jsou používány pro vysokoteplotní aplikace. Jsou většinou velmi tažné, mají dostatečnou pevnost a houževnatost. Pevnost se pohybuje až do 1000 MPa. Tyto slitiny mají též velkou tepelnou stabilitu a odolnost proti křehkému porušení i za velmi nízkých teplot. Horší je však jejich kujnost než u β slitin. α slitiny mají větší schopnost tvořit vady při kování, které lze snížit menšími úběry a častým ohřevem. Nemohou být zpevněny tepelným zpracováním na rozdíl od β slitin. α struktura je velmi stabilní, protože základním variabilním prvkem mikrostruktury α slitin je velikost zrn. Mají dobrou žárovevnost do 300 °C. Tyto slitiny jsou používány nejčastěji ve stavu žíhaném nebo rekrystalizovaném.

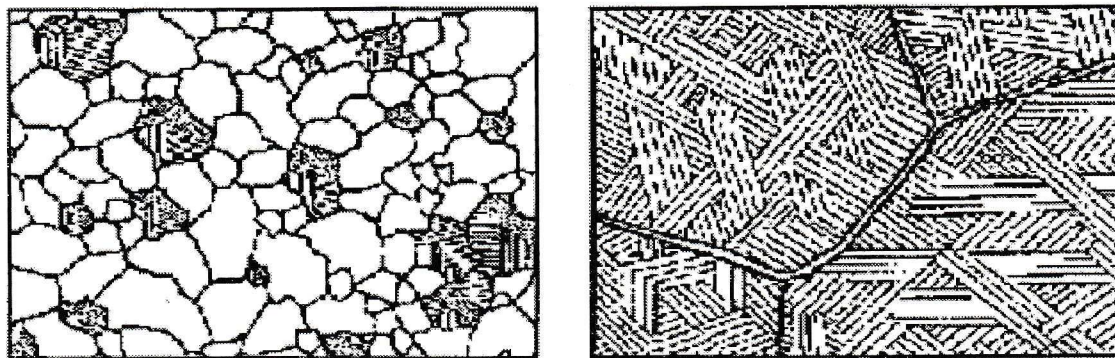
Optimální vlastnosti mají slitiny s asi 5 hm. % Al a 2 až 3 hm. % Sn. Mezi další vlastnosti patří nízká měrná hmotnost. Slitiny α jsou slitiny Ti – Al → obsah Al bývá většinou do 8 hm. %, další slitinou je Ti – Al – Sn → kromě Al obsahují 2–13 hm. % Sn [9].

2.1.2 Slitiny pseudo α

Do základní báze Ti – Al jsou přidány prvky stabilizující a zpevňující fázi β . Dalšího zpevnění se dosahuje neutrálně působícím Zr a Sn. Obsah fáze β bývá 2 až 6 hmot. %. Jsou to slitiny mající pevnost o 10 až 20 % větší než slitiny α a lepší tváritelnost za pokojové teploty v důsledku přítomnosti fáze β s větší plasticitou, než má fáze α [9].

2.1.3 Slitina $\alpha + \beta$

Vyznačují se širokou škálou struktur, a tedy i vlastností závislých na podmínkách tváření a tepelného zpracování. Mohou být tvořeny buď rovnoosými zrny, nebo lamelami obou tuhých roztoků případně směsmi obou těchto morfologií. Morfologická struktura je zobrazena na obr. 5. Jsou to nejčastěji používané slitiny (slitina TiAl6V4 je nejvíce používanou slitinou titanu). Tepelné zpracování nebo tepelně – mechanické zpracování může zpevnit $\alpha + \beta$ slitiny vlivem modifikace množství a typu přítomné α fáze. Mají lepší tváritelnost v žíhaném stavu než slitiny α a pseudo α , lepší odolnost proti únavovému namáhání a lze je tepelným zpracováním vytvrdit. Vytvrzené slitiny však mají sníženou lomovou houževnatost. Svařitelnost a odolnost proti tečení je horší než u slitin α a pseudo α [7].



a)

b)

Obr. 5 Hlavní morfologické typy struktur slitin titanu $\alpha + \beta$ v žíhaném stavu

a) rovnoosá zrna tuhých roztoků α a β

b) lamely tuhých roztoků α a β [7]

2.1.4 Slitiny β a pseudo β

Jsou to materiály dosud ve vývoji. Jsou legovány přechodovými prvky V, Nb, Mo – které snižují teplotu přeměny z β na α a podporují vznik KSC β . Jejich hlavní předností je vysoká odolnost proti korozi, velmi dobrá prokalitelnost a tvárnost za pokojové teploty, daná b.c.c. mřížkou fáze β . Mají výbornou kujnost v širokém intervalu kovacích teplot. Tenké plechy z β slitiny jsou tvárné za studena (ve stavu po rozpouštěcím žíhání). Slitiny β mají lepší schopnost tepelného zpracování (rozpouštěcí žíhání, kalení a stárnutí, vznikají jemné disperzní α částice ve zbytkové struktuře β) u větších profilů než v případě slitin $\alpha + \beta$. Nedostatkem je větší hmotnost než u jiných slitin titanu a značná cena, protože přísadovými prvky ve velké koncentraci jsou kovy s vysokou teplotou tání, jejichž výroba v požadované čistotě je velmi obtížná a nákladná. Pevnost v tahu u těchto slitin dosahuje po vytvrzení až 1400 MPa. Nejpoužívanější slitina je TiV13Cr11Al3, zpevňující fázi jsou intermetalické sloučeniny Ti_3Al , $TiAl$ [10].

2.1.5 Žáropevné pseudoslitiny titanu

Základ tvoří intermetalické sloučeniny aluminidy titanu Ti_3Al a $TiAl$. Oba aluminidy mají dobrou žáruvzdornost. Jejich žárovevnost je vyšší než u slitin titanu, srovnatelná se žárovevností slitin niklu. Mohly by být použity jako žárovevné součásti při teplotě až 900 °C. Jejich nedostatkem je velmi malá tvárnost za teplot do 600 °C, a tedy obtížné zpracování na požadovaný tvar součásti [11].

2.1.6 Materiály s tvarovou pamětí

Základem materiálů tohoto druhu je TiNi, který lze tvářet za studena. Projevuje se v něm jev, který je založen na orientované vratné martenzitické přeměně a je podstatou schopnosti materiálu ohřevem výrobku obnovit původní tvar polotovaru, ze kterého byl zhotoven [11].

3. Způsoby výroby Ti

3.1 Výroba Ti Krollovým procesem

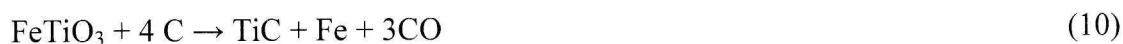
Průmyslová výroba titanu se provádí poměrně složitým, značně energeticky náročným procesem z chloridu TiCl_4 redukcí roztaveným hořčíkem nebo sodíkem (Krollův proces výroby titanu) nebo aluminotermicky. Zařízení pro výrobu Krollovou metodou je graficky znázorněna na obr. 6. Chlorid titaničitý potřebný pro Krollův proces se připravuje chlorací rutilu nebo ilmenitu.

Pokud je surovinou rutil TiO_2 , je postup jednoduchý, ruda se smísí s uhlím v poměru 3:1, briketuje se a poté kalcinuje v redukční atmosféře při teplotě 700°C . Vlastní chlorace se provádí v elektricky vytápěné šachtové peci při teplotě $800\text{--}1200^\circ\text{C}$, průběh chlorace znázorňují rovnice:



Chlorid titaničitý vzniká v párách a poté se kondenzuje jako nažloutlá kapalina. Před vlastním Krollovým procesem se chemicky čistí a destiluje.

Jestliže se použije ilmenit FeTiO_3 , musí se nejprve provést jeho selektivní redukce v obloukové peci na surové železo, titan tvoří snadno chlorovatelný karbid, který přejde do strusky. Pokud se redukce ilmenitu provádí za přídavku vzduchu nebo amoniaku, přechází titan do snadno chlorovatelného nitridu. Průběh redukce ilmenitu zachycují rovnice:



Chlorace karbidu a nitridu vzniklých redukcí ilmenitu potom probíhá podle rovnic:



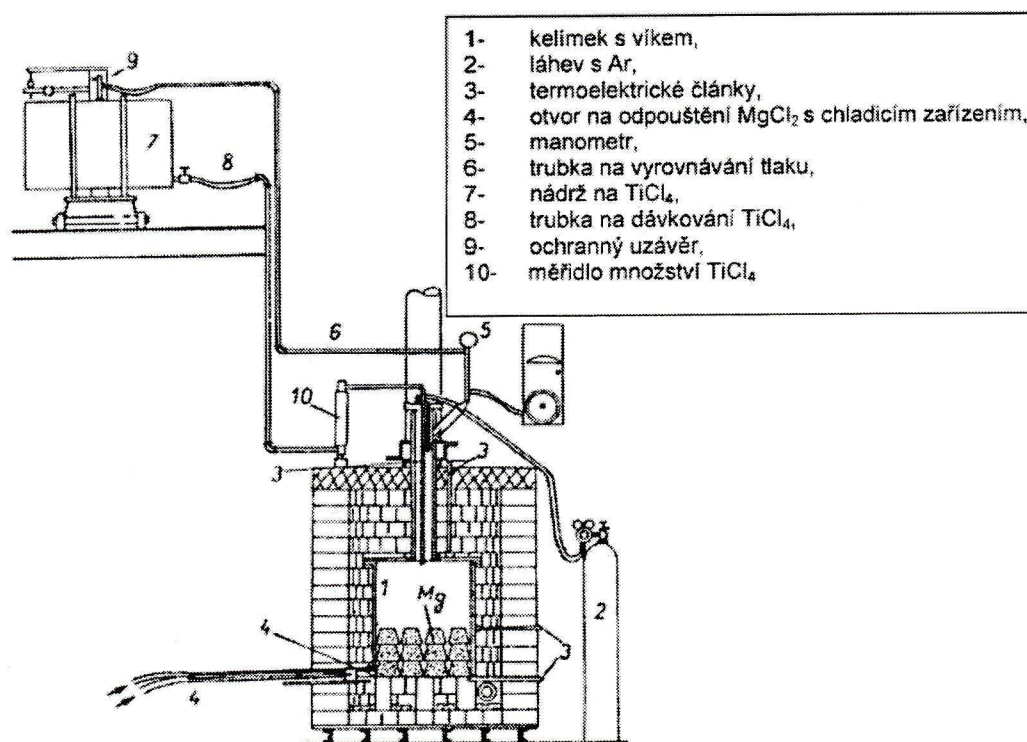
Krollův proces probíhá při teplotách 850–900 °C v železných nádobách v ochranné atmosféře helia nebo argonu. Průběh redukce chloridu titaničitého hořčíkem vyjadřuje rovnice:



Produktem je houbovitý titan, který se usazuje na stěnách kelímku. Nezreagovaný hořčík a vzniklý chlorid hořečnatý se odstraní promýváním kyselinou chlorovodíkovou nebo vakuovou destilací. Titanová houba se slisuje do tvaru elektrody, která se přetavuje v elektrické obloukové peci na kompaktní kov.

Modifikací původního Krollova postupu je Maddexův-Eastwoodův postup, který spočívá v redukci plynného chloridu titaničitého kapalným hořčíkem za zvýšeného tlaku. Produktem je suspenze kovového titanu v tavenině chloridu hořečnatého. Suspenze z redukční pece kontinuálně odtéká do elektrické pece, kde dojde k odpaření nezreagovaného hořčíku a chloridu hořečnatého.

Pro některé účely se používá slitina titanu se železem – ferotitan. Ferotitan se vyrábí redukcí rutilu a železné rudy uhlím [12].



Obr. 6 Zařízení pro výrobu titanu Krollovou metodou [12]

3. 2 FFC proces, perspektiva výroby titanu

Ve stádiu poloprovozních zkoušek je velice perspektivní a levná výroba titanu elektrolytickou redukcí. Tento postup je po svém objeviteli prof. Frayovi pojmenován jako Frayův proces výroby titanu (FFC proces). Elektrolyzují se pelety TiO_2 , elektrolytem je tavenina CaCl_2 , katoda i anoda jsou z grafitu. Pracuje se s napětím 2,8-3,2 V za teploty 950-1000 °C v inertní atmosféře. Redukčním činidlem je vápník vznikající na katodě. Elektrokalciotermická redukce oxidu titaničitého probíhá v několika stupních, při kterých jako meziprodukty postupně vznikají oxidy Ti_3O_5 , Ti_2O_3 a TiO .

Elektrolyzátor pro elektrolytickou redukci tvoří skloněná ležatá nádoba. Grafitová anoda tvoří víko a katoda dno elektrolyzátoru. Do šikmé mezery mezi elektrodami se kontinuálně dávkuje válcovité pelety TiO_2 o průměru 5-10 mm a výšce 2-10 mm, které se gravitačně posunují po šikmém dně. V nejnižším místě nádoby se hromadí pelety vyredukovaného titanu, které se mechanickým dopravníkem nepřetržitě odstraňují.

Výhodou FFC procesu je zejména rychlost a jednoduchost celého postupu. Stejným způsobem se pokusně podařilo vyredukovat příslušné kovy i z Cr_2O_3 , Nb_2O_5 , ZrO_2 , Ta_2O_5 , WO_3 , CeO_2 . FFC procesem se také podařilo připravit několik zajímavých intermetalických sloučenin, např. TiNi , TiAl_3 , Ni_3Al , TiNb , $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$, Ni_2MnGa .

Byly vyvinuty i další alternativní technologie výroby titanu, např. redukce chloridu titaničitého vodíkem, termický vakuový rozklad chloridu titanitého TiCl_3 na prvky, tavná elektrolýza $\text{K}_2[\text{TiF}_6]$ nebo redukce TiO_2 hydridem vápenatým [13].

3.3 Rafinace titanu

Rafinace titanu se provádí van Arkel – de Boerovou metodou (převedením na jodid titaničitý a následným rozkladem par této látky při 1300 °C).

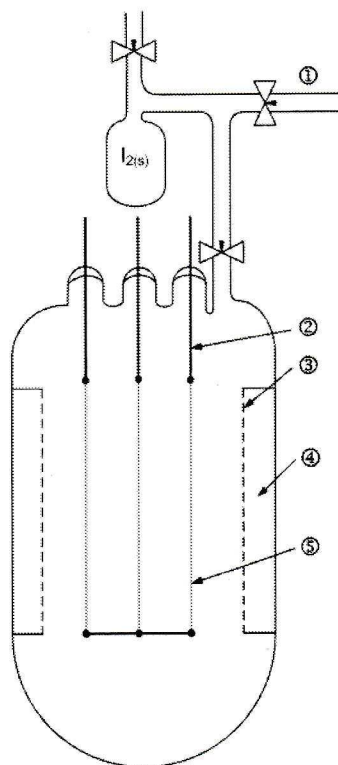
Proces van Arkel – de Boer je také známý jako jodidový proces. Tento průmyslový proces byl poprvé vyvinut v roce 1925. Výrobní postup byl prvně použit pro komerční výrobu čistého tvárného kovu zirkonia. Jedná se především o tvorbu kovových jodidů a jejich následný rozklad za vzniku čistého kovu. Proces rafinace byl později nahrazen Krollovým procesem.

Celý proces je znázorněn na obr. 7. Nečistý (kontaminovaný) titan se zahřívá ve vakuové nádobě s jodem (nebo jiným halogenem) při teplotě 50–250 °C. Proces vzniká jako mezičlánek mezi TiI_4 a ZrI_4 , které byly těkavé (odcházející nečistoty jsou jako pevná látka). Při atmosférickém tlaku TiI_4 taje při 150 °C a má teplotu varu při 377 °C, zatímco ZrI_4 taje při 499 °C a má teplotu varu při 600 °C. Body varu jsou nižší za sníženého tlaku. TiI_4 se rozkládá

na wolframovém vlákně (1200 °C). Pokud je ukládáno více a více, vlákno začne lépe vést elektrický proud, a proto je nutné větší množství elektrického proudu pro udržení teploty vlákna. Tento proces může být proveden v rozpětí několika hodin nebo týdnů, v závislosti na konkrétní instalaci. Popsaný způsob je možno vyjádřit dvěma rovnicemi:



Jediné kovy, které byly použity k čištění v průmyslovém měřítku, jsou titan, zirkonium a hafnium, a ve skutečnosti se ještě používají dnes v mnohem menším měřítku pro speciální potřeby vzhledem ke své čistotě [14].



Obr. 7 Zařízení používané pro proces van Arkel-de Boer. Tělo je vyrobeno z křemenného skla. [14]

- (1) - vývěva
- (2) - 6 mm elektroda molybden
- (3) - čistý molybden
- (4) - komora pro suroviny
- (5) - wolframový drát

4. ISM

4.1 Tavení titanu

Titanové odlitky jsou dražší než vyráběné odlitky např. z nerezové oceli. Cena těchto odlitků je ovlivňována několika faktory:

- Titan reaguje s kyslíkem a dusíkem snadněji, proto tavení, lití a chlazení titanu musí probíhat ve speciálním prostředí jako je vakuum nebo inertní atmosféra
- Titan se odlévá do nereaktivních forem (nejčastějším materiálem jsou sloučeniny zirkonia a thoria)
- Recyklace titanu je obtížná
- Lití titanu není dokonalé, jsou vyžadovány opravy a zdokonalení těchto odlitků, které jsou velmi náročné

Tyto nevýhody minimalizuje tavení ve studeném kelímku. Lití titanu metodou vytavitelného modelu má mnoho výhod, kterými jsou zkrácení doby cyklu v porovnání s indukčním tavením ve vakuu. Tato metoda používá vodou chlazený měděný kelímek. Tento kelímek zabraňuje kontaminaci, která je spojena s klasickým indukčním tavením ve vakuu v keramickém kelímku a též umožňuje recyklaci šrotového kovu. Proces ISM je často používaná technologie pro výrobu širokého sortimentu nízkonákladových titanových odlitků, které jsou velmi kvalitní.

Pro lití titanu je výroba forem za použití metody vytavitelného modelu podobná jako u forem pro odlitky ze slitin železa. Ovšem i zde je několik důležitých rozdílů. U slitin železa je materiálem používaným pro výrobu forem oxid křemíku a oxid hliníku. Tyto žárupevné oxidy nemohou být použity pro formy na lití titanu z důvodu vysoké afinity titanu ke kyslíku. Pokud tyto materiály jsou použity, vede to k nežádoucím stavům na povrchu odlitků a jejich vysoké porezitě. Současně dochází k vytváření křehké hluboké vrstvy reaktantů, a to způsobí obtížnost obrábění z důvodu jejich tvrdosti. Tato vrstva podněcuje vznik trhlin ve vysoce pevných slitinách jako např. Ti-6Al-4V. Materiály pro formy lití ztraceným modelem jsou vyrobeny ze žárupevných materiálů na bázi zirkonia, thoria a yttria.

Obsah kyslíku v titanu ovlivňuje pevnost odlitků – vyšší obsah kyslíku způsobí vyšší pevnost. Proto tedy je pečlivě kontrolován obsah kyslíku v surovém materiálu. Recyklát s vysokým obsahem kyslíku je smícháván s čistým materiálem, ale chudým na kyslík. Tímto způsobem můžeme docílit opakovatelný obsah kyslíku pro každé lití.

Proces ISM umožňuje jednodušší dávkování přísadových materiálů a legovacích prvků. Materiál může být přidáván přímo do taveniny, a to i ve velkých objemech. Zároveň se

snadněji řídí dávkování příměsí s vysokým tlakem par jako je např. mangan. Kov je potřebné udržet v roztaveném stavu po delší dobu, dokud nedojde ke kompletnímu roztavení příměsí např. tantalu nebo wolframu.

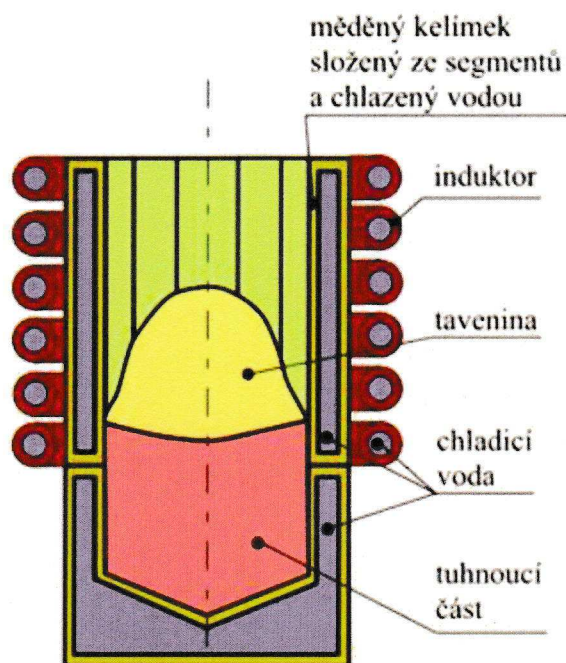
Následně je roztavený materiál nalit do formy a v kelímku zůstává tenká skořepina. Tato skořepina může být odstraněna rychle, což umožní rychlejší přípravu pro tavení další slitiny. Tím se v ISM procesu zkracují lící časy.

Výhodou procesu ISM při lití titanu do ztraceného modelu je možnost získání vysoce kvalitních odlitků při nízkých nákladech. Snížení nákladů je docíleno dvěma faktory. Jedním faktorem je eliminace drahé výroby tavných elektrod a druhým faktorem je použití pro vsázku levnějšího, certifikovaného materiálu (z hlediska chemického složení) [15].

4.2 Princip tavení ve studeném kelímku

Principem tavení materiálu ve studeném kelímku se zabývá řada pracovišť na celém světě. Studený kelímek je zařízení, které má v průměru až několik desítek centimetrů a můžou se v něm tavit materiály ve velkých množstvích. K hlavním přednostem této metody indukčního ohřevu patří, čistota materiálu při tavení, kdy tavený materiál se dotýká povrchu nádoby, takže nedojde k znečištění a současně se dosahuje vysokých procesních teplot.

ISM (induction skull melting) je metoda pro tavení kovů (obr. 8) v dělené, vodou chlazené měděné nádobě, která je umístěna uvnitř indukčního vinutí ve vakuu nebo řízené atmosféře. Metoda, která je zde použita „kov na kov“ je bez žárupevného obložení. Měděný kelímek je složen z chlazených segmentů nebo „prstů“, které jsou chlazené vodou. Magnetické pole procházející kelímkem vede k ohřevu kovové vsázky a následnému roztavení této vsázky. Magnetické pole současně promíchává i taveninu. V místě styku mezi vsázkou a kelímkem se vytváří tenká vrstva pevného kovu. Rozhraní mezi skořepinou a kelímkem a současně i mezní vrstva taveniny s nízkou energií a s tuhou skořepinou slouží jako tepelný izolant. Takto je přestup tepla z horké taveniny do studeného kelímku zmenšen [15].



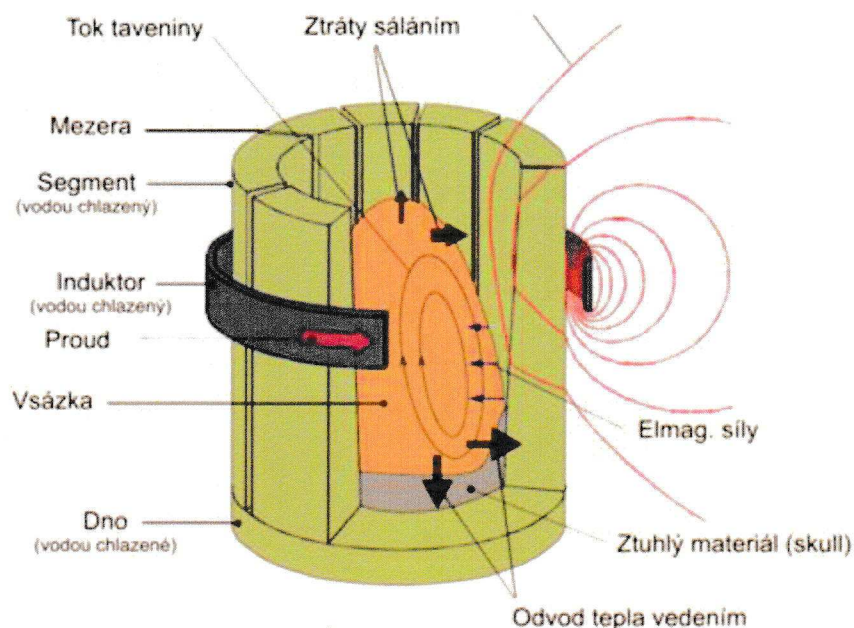
Obr. 8 Schéma indukčního tavení ve studeném kelímku [16]

Jestliže kelímek, cívka a zdroj energie jsou správně zkonstruovány a frekvence je vhodně nastavena, pak ke středu kelímku jsou vtlačovány stěny roztavené kovové lázně. Stěny taveniny jsou podpírány magnetickým polem. Pokud nedochází k fyzickému kontaktu mezi taveninou a stěnami kelímku je zabráněno vzniku zkratu a zároveň pokud nedochází k tomuto kontaktu, snižují se tepelné ztráty do kelímku. Při tomto procesu využijeme odlévání horem nebo spodem, ale také jej můžeme využít při výrobě ingotů. Jestliže je použit kelímek s otevřeným dnem a spodem taženou spouštěcí zátkou, která formuje ingot, je vsázkový materiál plněn horem. Energie je dodávána z generátoru. Tento generátor je konstruován na určenou dodávku energie a frekvence pro proces ISM. Energie je vedena vakuovou komorou prostřednictvím hermetického, vodou chlazeného koaxiálního rotačního vedení do tavné cívky [15].

4.3 Princip indukčního ohřevu

Princip indukčního ohřevu je zjednodušeně popsán na obr. 9. Kelímek se skládá ze vzájemně izolovaných měděných segmentů. Segmenty jsou chlazený vodou. Tok energie elektromagnetického pole vstupuje do taveniny mezerami segmentů. Induktorem z dutého měděného vodiče, který je chlazen vodou, protéká střídavý proud a vyzařuje elektromagnetické vlnění. Při dopadu elektromagnetických vln na stěnu vsázky vzniká přímo ve vsázce teplo. Jedna část vlnění, která dopadne na povrch vsázky, se odrazí a vrací se zpět a druhá část vlnění prochází stěnou. Vlnění procházející stěnou následně vyvolá vířivé proudy. Elektrony se pohybují v krátkých volných drahách se značnou kinetickou rychlostí ve směru

intenzity elektrického pole. Nárazem elektronu do atomu vodiče dojde k předání kinetické energie a to má za následek zvýšení teploty materiálu [17].



Obr. 9 Princip indukčního ohřevu [17]

Takto lze přirovnat indukční ohřev k transformátoru, kde primární vinutí je tvořeno cívkou a sekundární vinutí představuje vsázka nakrátko [17].

4.4 Konstrukční provedení kelímku

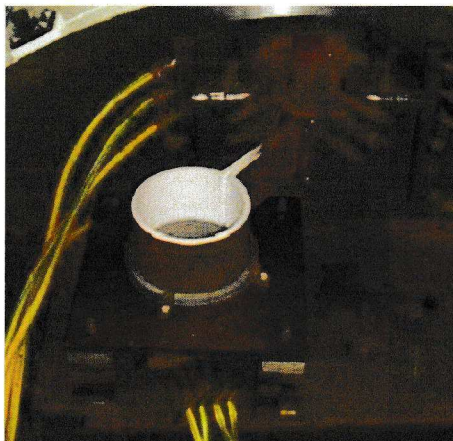
V indukčních pecích s vodivým kelímkem dochází pod vlivem elektromagnetické energie ke vzniku naindukovaného tepla, čímž dojde i přes intenzivní chlazení k zahřátí kelímku. Pro ISM proces je to nežádoucí. K zajištění vysoké čistoty materiálu je potřeba zajistit velmi tenkou krustu na stěnách kelímku tak, aby kelímek zůstal po celou dobu tavení studený.

U studeného kelímku jsou možné dvě varianty konstrukčního provedení. První varianta je kelímek tvořený vodou chlazenou cívkou, která představuje stěnu kelímku. Druhou variantou je kelímek složený z jednotlivých kovových segmentů, které jsou také intenzivně chlazené vodou. Místo určení pro cívkou je vně kelímku jako u indukčních kelímkových pecí [18].

4.4.1 Kelímek jako cívka

Kelímek tvoří jednoválcová cívka, případně více segmentů nad sebou, a využívají se převážně pro tavení elektricky špatně vodivých materiálů. Materiály, které takto můžeme tavit, jsou například oxidy, keramika a sklo, které mají tavicí teplotu vyšší než 2 000°C.

Proces natavování je dán od jádra materiálu a na povrchu zůstává krusta vsázkového materiálu. Vsázkový materiál je ohraničen závitem chlazené cívky [18, 19].



Obr. 10 Reálný kelímek s integrovaným induktorem [20]

Tento způsob má výhodu ve vyšší elektrické účinnosti a nižší ztrátě. Ze vztahu pro určení elektrické účinnosti indukčních pecí je patrná vyšší účinnost, protože neuvažujeme s členem R_3 . Proto taktéž odpadají problémy s naindukovanými proudy v kelímku a též se ztrátami v mědi, které nevznikají. Jestliže bude použito kelímku z jednotlivých segmentů, je účinnost cca 33%. U cívky tvořící přímo stěnu kelímku lze očekávat vyšší účinnost než u kelímku z jednotlivých segmentů [19].

Vztah pro výpočet elektrické účinnosti indukčních pecí:

$$\eta = \frac{R_2}{R_2 + R_1 + R_3} \quad (17)$$

η – účinnost indukční pece

R_1 – rezistivita materiálu induktoru

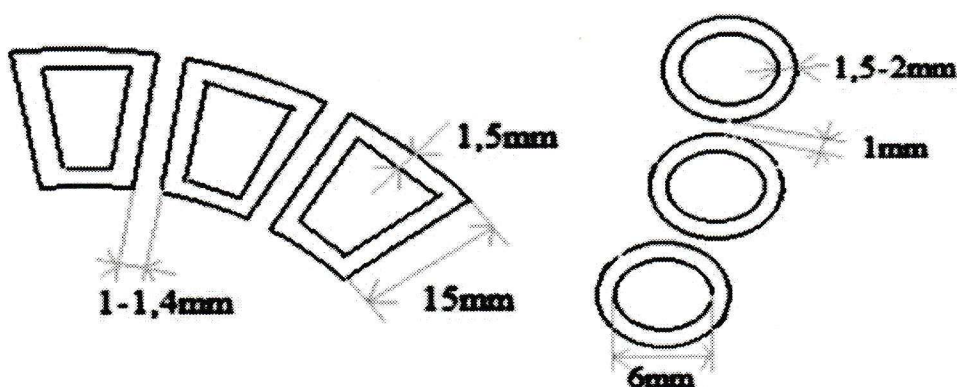
R_2 – rezistivita vsázky

R_3 – rezistivita materiálu kelímku

Nevýhodou je složitá konstrukce induktoru a je zapotřebí intenzivního ochlazování z důvodu přímého styku s taveninou. Pokud bude použita dokonalá izolace, napájí se napětím 1 kV, aby nedošlo ke vzniku zkratu mezi přívody cívky. V praxi je využívána druhá varianta konstrukce [19].

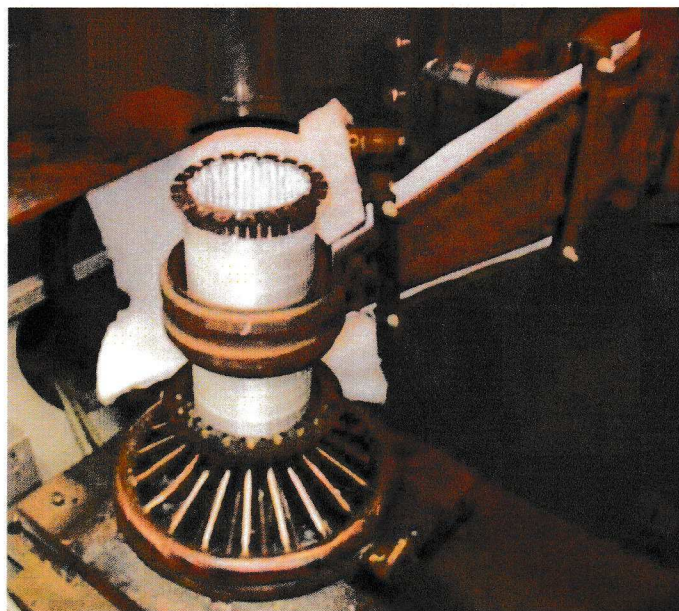
4.4.2 Kelímek tvořený segmenty

Konstrukce se skládá ze dvou dílů, a to z kelímku a z médiem chlazeného induktoru. Pro zvýšení účinnosti je konstrukční řešení kelímku navrženo do segmentů nebo duté trubky. Tvary segmentů jsou zobrazeny na obr. 11. Nejvíce využívané materiály pro konstrukci kelímku jsou nemagnetické kovy. Mezi používané materiály patří nerezová ocel, hliník a nejčastěji měď z důvodu vysoké elektrické a tepelné vodivosti [18, 19].



Obr. 11 Tvary segmentů studeného kelímku [15]

Rozměry trubek, segmentů a mezer mezi nimi jsou dle provedených experimentů přesně stanoveny. Mezi jednotlivými bloky je potřeba mít minimální mezeru, která udrží taveninu uvnitř kelímku. Současně je zapotřebí, aby daná vzdálenost byla bezpečná pro napětí mezi stěnami segmentu, kdy klesá s rostoucí teplotou a množstvím nečistot. Mezera mezi bloky se volí 1 mm, protože je technicky velmi obtížné dosáhnout menších hodnot. Pro kruhový průřez je 1 mm limitní, pro ostatní segmenty je možné mezeru navýšit až na 1,4 mm. Tloušťka stěn se z mechanického hlediska volí 1,5 mm a šířka nad 5 mm z důvodu tlaku chladicího média. Při těchto rozměrech je zajištěno dostatečné chlazení. Běžně se používají kelímky s několika desítkami segmentů. Konstrukční uspořádání kelímku je zobrazeno na obr. 12 [18, 19].



Obr. 12 Studený kelímek tvořený segmenty [20]

Pro určení počtu segmentů pak lze vycházet:

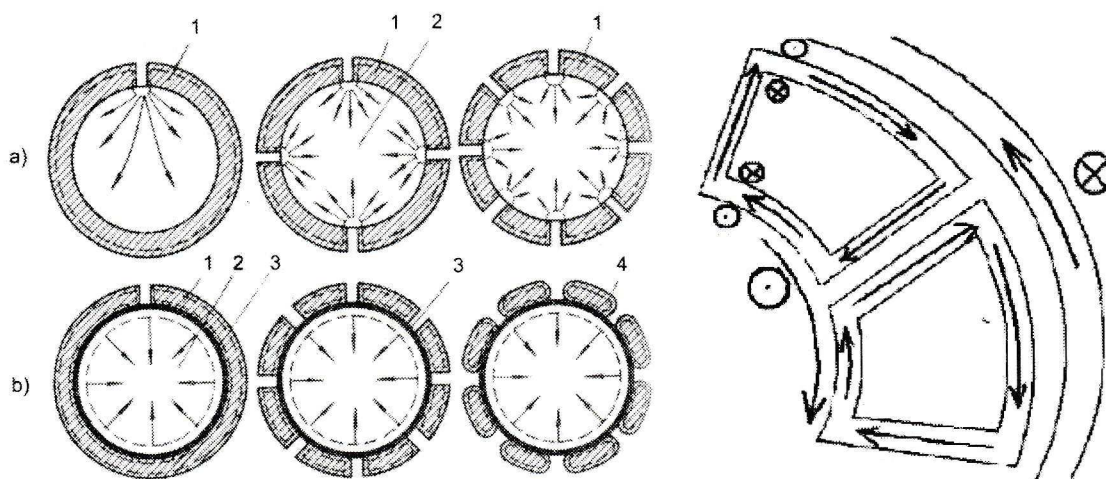
$$n \approx \frac{\pi d}{b+1} < \frac{\pi d}{6} \quad (18)$$

n – počet segmentů

d – průměr vsázky

b – šířka segmentu

U tohoto provedení kelímku dochází ke snížení tepelné účinnosti, poněvadž mezi vnitřním povrchem kelímku a taveninou vzniká elektrický kontakt. Mezerami segmentů prochází magnetické pole a budí elektrický proud, který je uzavřen přes obvod segmentů a mezer, jichž se dotýká vsázka. Při tavení kovů ve studeném kelímku je nejvhodnější variantou použití izolantu, protože pronikání magnetického pole do taveniny je rovnoměrné a zvýší se tak účinnost zařízení. Obr. 13 zobrazuje konstrukci s tenkou izolační vrstvou Al_2O_3 nebo ZrO_2 , kde proud uzavírá taveninu v jednotlivých segmentech. Při použití odizolování se docílí stejné intenzity ve všech bodech na povrchu vsázky a také i rovnoměrného ohřevu [18, 19].



Obr. 13 Pronikání magnetického pole segmenty [15]

a) bez izolace, b) s izolací, 1 – segment, 2 – tavenina, 3 – izolační vrstva

Tavíme – li materiály, které mají špatnou elektrickou vodivost, jako jsou např. oxidy kovů a skla, účinnost které zde dosahujeme je až 90%. Proces tavení je stejný jako při tavení vodivých materiálů, ale nastávají zde potíže s nastartováním tavby. Materiály nevodivé nelze indukčně ohřívat z pokojové teploty a je zapotřebí v závislosti na daném materiálu zvolit takové řešení, které uskuteční tavení. První variantou je přidání startovacího materiálu, od kterého se začne tavit i vsázka. Aby nedocházelo k roztavení veškeré vsázky, je zapotřebí regulovat tavbu snižováním výkonu a masivním chlazením kelímku. Materiál, který použijeme jako startovací, je zapotřebí volit dle fyzikálních a chemických vlastností, aby zabránily kontaminaci ve vsázce. V určitých případech se používá materiál, který může negativně ovlivňovat vsázku a potom je potřebné vkládat minimální množství startovacího materiálu, popřípadě tento materiál po nastartování tavby odstranit. Další možností pro nastartování tavby je ohřátí vsázky pomocí jiného zdroje tepla, například elektrickým obloukem či laserovým paprskem na určitou teplotu, při které se zvyšuje elektrická vodivost vsázky na potřebnou hodnotu pro její tavení elektromagnetickou indukcí [18, 19].

4.5 Energetická bilance procesu ISM

Při indukčním ohřevu platí zásada, že požadovaný elektrický výkon závisí na zvolené pracovní frekvenci, která musí být přizpůsobena elektrické vodivosti taveniny a velikosti kelímku. Elektromagnetické pole je absorbováno nejen v tavenině, ale rovněž v indukční cílce a kelímku. Ztráty mohou být značné při nevhodně zvolené frekvenci a mohou nepříznivě ovlivnit úspěšný start ISM procesu z hlediska omezeného výstupního příkonu zdroje. Proces tavení je vnitřně limitován tepelným tokem z taveniny přes krustu do kelímku,

kde teplo je odváděno chladicí vodou. Další ztráty tepla mohou být způsobeny radiací, zejména z taveniny v kelímku s velkým průměrem.

Pro celkovou energetickou bilanci musí být ztráty nahrazeny ekvivalentní absorpcí energie v tavenině. Pro daný přívod se dá po té z energetické bilance vypočítat objem taveniny. Při těchto výpočtech je uvažováno, že elektromagnetický výkon, který je absorbovaný v tavenině P_{me} a tepelný výkon vystupující z taveniny P_{th} je v závislosti na poloměru taveniny r_{me} , velikosti indukčního proudu a frekvenci [21].

4.6 Ztráty vzniklé při procesu ISM

4.6.1 Ztráty příkonu a tepelné ztráty

Tepelný výkon vystupující z taveniny je dán vztahem [21] :

$$P_{th} = \frac{2\pi \cdot \lambda_{SC} \cdot h_{me} \cdot (T_{me} - T_{cw})}{\ln(r_{cr} / r_{me})} \quad (19)$$

P_{th} – absorbovaný elektromagnetický příkon v tavenině

λ_{SC} – tepelná vodivost Skull krusty

h_{me} – výška taveniny

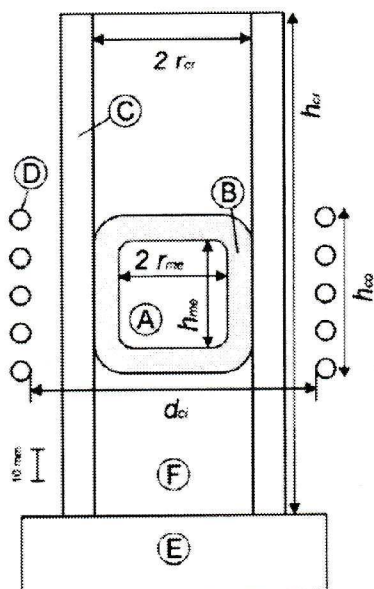
T_{me} – teplota tavení

T_{cw} – teplota chladicí vody

r_{cr} – vnitřní poloměr kelímku

r_{me} – poloměr taveniny

Pro určení absorbovaného výkonu v cívce P_{co} , kelímku P_{cr} a v tavenině P_{me} se používá elektrický obvod systému ISM. Tento obvod je zobrazen na obr. 15 [21].



Obr. 15 Příčný řez ISM kelímkem: A – objem taveniny, B – slinovaná krusta, C – kelímek s palisádovou stěnou, D – indukční cívka, E – dno kelímku, F – zhutněný prášek ZrO_2 [22]

V obvodu cívky musíme zahrnout jednotlivé odpory, které se vyskytují vlivem přítomnosti kelímku a taveniny uvnitř cívky. Odpovídající ztráty získáme výpočtem ze vztahu [21]:

$$P = R(I_{co})^2 \quad (20)$$

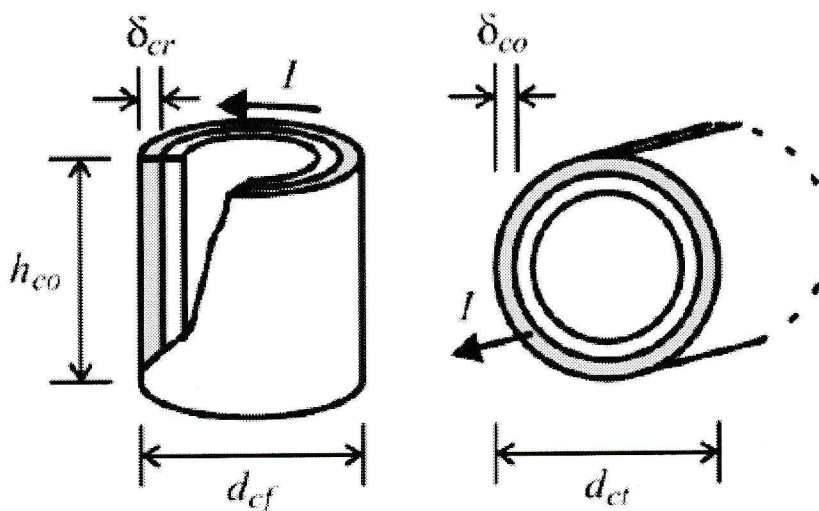
P – příkon

R – odpor

I – proud

4.6.2 Ztráty v cívce

V používaném rozmezí frekvencí (100 kHz až 10 MHz) je vliv pláště zřetelný na všech měděných součástech. Ohmické ztráty v těchto částech mohou být vypočteny s velmi reálnou hodnotou, pokud vrstva pláště má konečnou tloušťku s konstantní hustotou proudu uvnitř této vrstvy a s nulovým proudem v tloušťce materiálu. Z tohoto modelu vychází obr. 16 [23].



Obr. 16 Plášť chladicích prstů kelímku (vlevo) a trubka induktoru (vpravo) se směrem proudu (I) [23]

4.6.3 Ztráty v kelímku

Proudy v chladicích prstech kelímku jsou indukované RF polem cívky induktoru. V souladu s energetickou bilancí můžeme předpokládat, že tyto proudy jsou limitovány na části chladicích prstů, které jsou uloženy uvnitř cívky. Proudové v chladicích prstech musí odstínit jejich vnitřek od magnetického pole cívky, spojeného s proudem v cívkce. Takto se projevují ztráty v kelímku [23].

5. Producenti titanu metodou ISM

Významným producentem titanu, který používá proces ISM je ruský výrobce Avisma. Avisma je významným globálním výrobcem titanu, ingotů z titanu a všech typů meziproduktů z titanové slitiny.

Pomocí využití procesu ISM umožňuje další vývoj společnosti. Tato společnost využitím procesu ISM dodává produkty 300 společnostem ve 48 zemích světa, včetně takových globálních představitelů jako Boeing, Airbus, SNECMA, Rolls Royce, Pratt & Whitney. VSMPO-Avisma splňuje 40% poptávky společnosti Boeing z leteckého titanu, 60% poptávky EADS (Airbus) a 100% poptávky společnosti Embraer.

Nejvíce požívanou slitinou vyráběnou tímto procesem je Ti – Al6 – V4 s vysokou pevností v tahu, která se stala standardem pro Boeing 787 Dreamliner (pro díly např. pozemní převod, pylon a komponenty křídla) [24].

Dalším výrobcem používající proces ISM je americký výrobce Precision metal products. Precision metal products INC je významným výrobcem výrobků z titanu s malou

tolerancí pro lékařské, letecké a průmyslové aplikace. Použitím procesu ISM a následnými různými technologiemi umožňuje PMP poskytovat přesné výrobky s vysokou tolerancí, což výrazně snižuje náklady na suroviny.

Tato společnost používající proces ISM dodává produkty do takových společností jako je Sotera medical, Dassault nebo Saab AB [25].

6. Slitiny titanu v praxi

6.1 α slitiny

Typickým představitelem alfa slitin je Ti-Al5-Sn2,5. Tato slitina se vyznačuje strukturní stabilitou, odolností proti vysokoteplotní oxidaci a malou citlivostí pevnostních vlastností za vyšších teplot k předchozímu tepelnému zpracování. Jsou dobře se svařitelné za použití laseru nebo svazku elektronů. Udržují vysokou houževnatost u při nízkých teplotách, zejména při sníženém obsahu nečistot. Nevýhodou je citlivost na vodíkovou křehkost. Tato slitina se používá na lopatky leteckých motorů a parních turbín [26].

6.2 Slitiny pseudo α

Představitelem pro tuto oblast je slitina Ti-Al8-Mo1-V1. Tato slitina zachovává vlastnosti slitin α , ale navíc má lepší plasticitu v důsledku přítomnosti β fáze a menší citlivost ke škodlivému vlivu vodíku. Pevnost se mění zejména v závislosti na obsahu hliníku. Tato slitina se používá do součástí draků a turbokompresorů letadel [26].

6.3 Slitiny $\alpha + \beta$

Nejpoužívanější slitinou nejenom této skupiny, ale všech slitin titanu se stala Ti-Al6-V4, na jejíž výrobu se spotřebuje kolem 50 % celkové produkce titanu. Biokompatibilita je u této slitiny vynikající, zejména při přímém kontaktu s tkání nebo kostí. K dalším přednostem patří optimální mechanické vlastnosti, dobrá zpracovatelnost i svařitelnost. Vyrábějí se z ní všechny druhy tvářených polotovarů, odlitky i tvarově složité součásti práškovou metalurgií. Pevnostní vlastnosti se dají zvýšit tepelným zpracováním. Nedostatkem je použití do teploty 450 °C, po překročení teploty dochází k degradaci mechanických vlastností.

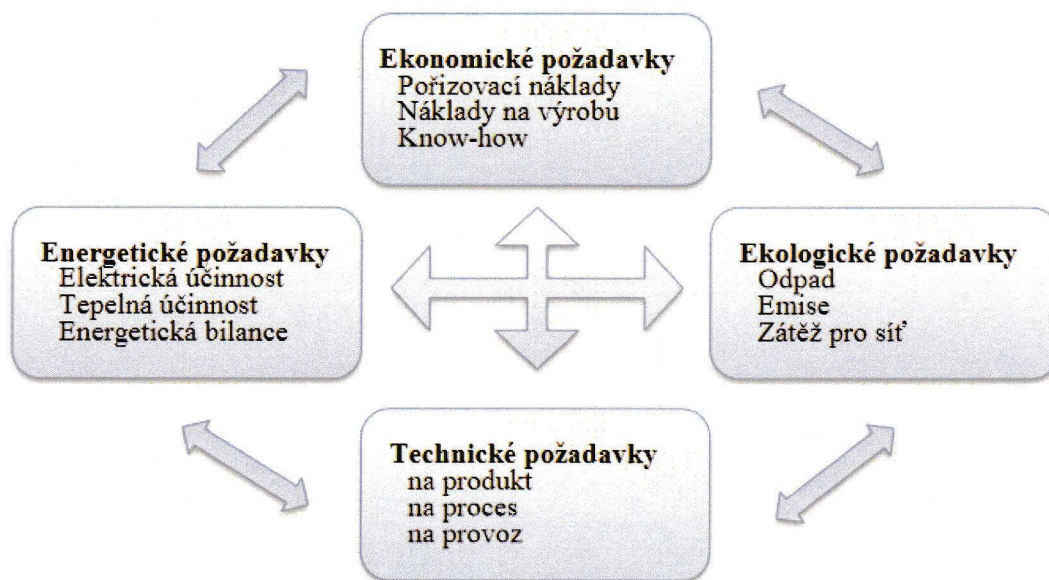
Tato slitina se používá do součástí leteckých motorů, čerpadel pro plyny nebo chemikálie. Velmi často je využívána pro součásti turbokompresorů, jako jsou např. oběžná kola. Další odvětví, kde tato slitina má mnoho aplikací je lékařství. Vzhledem k její biokompatibilitě se používá jako biomedicínské implantáty [6,26].

6.4 Slitiny β a pseudo β

Představitelem této skupiny je slitina Ti-V13-Cr11-Al3. Tato slitina má velkou pevnost v žíhaném stavu a zušlechtním dosahuje pevnosti až 1400 MPa, dále velmi dobrou tvářitelností za pokojové teploty, která je dána BCC mřížkou. Vysoký obsah legujících prvků (V, Cr) o velké měrné hmotnosti je příčinou větší hmotnosti v porovnání s ostatními titanovými slitinami. Výroba je obtížná a drahá, důsledkem je větší cena. Použití této slitiny je na svornících a panelech součástech kosmických lodí nebo letadel [26].

7. Zhodnocení procesu tavby pomocí procesu ISM

Metoda tavení ve studeném kelímku je relativně mladá a podléhá neustálému vývoji a zdokonalování. Přes některé nesporné výhody existují stále určitá úskalí, s nimiž se potýkají v řadě výzkumných pracovišť po celém světě (Rusko, Německo, USA, Japonsko, Čína). Vystávají zde především otázky technické, energetické ekologické a ekonomické povahy. Hodnocení technologie ISM je tedy možno provádět dle uvedených hledisek viz obr. 17.



Obr. 17 Provázanost hodnotících kritérií [12]

V následující části jsou rozebrány přednosti a nevýhody tavení materiálu procesem ISM [12,16].

7.1 Výhody ISM

Klíčovou výhodou tohoto způsobu tavení je možnost dosažení procesních teplot nad 3 000°C bez zásadního omezení. Při tomto procesu je zajištěna vysoká čistota, poněvadž

vlivem intenzivního chlazení vsázka nepřichází do styku s materiálem kelímku. Na stěnách kelímku se vytvoří z vlastního taveného materiálu tenká tuhá vrstva – skull, která zabraňuje kontaminaci dané taveniny.

Tavení probíhá hlavně ve vakuu. Tyto atmosféry kladně ovlivňují průběh procesu. Nejčastěji využívaným typem tavení je tavení ve vakuu nebo v inertní atmosféře, kdy nedochází ke zvyšování objemu kyslíku ve zpracovávaném materiálu. Prostřednictvím elektrodynamických sil dochází k pohybu částic v tavném materiálu. Vsázka se intenzivně promíchává v celém svém objemu; nečistoty vyplouvají k vnějšímu povrchu taveniny, kde se odpařují nebo připojí k již existující krustě – skull. Tímto způsobem je zajištěna možnost dosáhnout superčistých homogenních slitin.

Při používání procesu ISM ve vakuu, dochází k odplynění kovové vsázky a zároveň i vypaření nečistot s nízkým tlakem par. Výsledkem jsou pak kvalitní odlitky bez bublin, které souvisí s technikou lití. Intenzivní míchání způsobené elektromagnetickým polem pomáhá taveným složkám s vysokým bodem tání a také homogenizaci taveniny. Výsledkem tohoto tavení je kratší doba, lepší zabíhavost při lití do formy a vysoká kvalita odlitků. Absence keramického kelímku snižuje množství odstávek z důvodu výměny kelímku, a tím se zvyšuje produktivita pece.

Procesem ISM lze odlévat menší objemy taveniny, tenkostěnné a tvarově složité odlitky [12,14,16,18,19].

7.2 Nevýhody ISM

Z energetického hlediska dochází k teplotním změnám při procesu tavení. Aby vsázka nezatuhla, je potřeba kompenzovat tepelné ztráty v kelímku a segmentech. Při porovnání tavení s keramickým kelímkem jsou pece se studeným kelímkem velice energeticky náročné, a to z důvodů vysokých pořizovacích nákladů na tavící pece, zavedení technologie a údržby během procesu.

Z technologického hlediska je složitější výroba segmentů ve tvaru zaoblených lichoběžníků než výroba studeného kelímku skládaného z trubek. Nejnáročnější je výroba kelímku s integrovaným induktorem.

Při nekontrolovatelném přívodu výkonu do vsázky hrozí proražení krusty, explozi a při poškození kelímku také k úniku roztaveného materiálu do okolního prostředí. Příkladem je tavení TiAl, kde by zvýšené množství Al způsobilo při roztavování vysoký tlak s možností exploze. S ohledem na nutnost intenzivního chlazení kelímku dochází k velké spotřebě chladicího média.

Při výpadku proudu musí být zabezpečeno havarijní chlazení. Toto chlazení pracuje ještě předem stanovený časový úsek po odstavení tavení v kelímku, který má vlastní zdroj energie (baterie). Tento proces je důležitý pro minimalizaci vzniku vodíku. [12,14,16,18].

8. Závěr

Proces tavení ISM řadíme do kategorie technologií VIM (vakuově indukční tavení), jejichž základy byly položeny v 50. letech minulého století.

V dnešní době je nejvíce zkoumaným prvkem titan a jeho sloučeniny. Titan lze díky výjimečným vlastnostem použít v aplikacích, kde jiné kovy selhávají např. leteckém, automobilovém a lékařském průmyslu a vysoce únosných konstrukcí, díky jeho vysokému poměru pevnosti vůči hmotnosti. Aplikace titanu je však cenově velmi náročná. Proto se hledá co nejvhodnější způsoby výroby titanu. Jednou z těchto metod je proces ISM.

V současné době probíhá intenzivní výzkum této technologie na řadě renomovaných pracovišť po celém světě, často založený na experimentálním přístupu. Příprava a zpracování některých nových žárovevých např. niklových superslitin by nebyla možná bez přispění ISM. Tento proces tavení patří mezi finančně náročnější technologie, ale existují již mnohé praktické případy, kdy použití tohoto procesu je nevyhnutelné. Jedním z případů je titan s požadovanou vysokou čistotou výsledného produktu. Proces ISM tavení vyloučí možnou kontaminaci vsázky materiálem kelímku a navíc je možné proces provádět v ochranné atmosféře. K dokonalé homogenizaci výsledné slitiny přispívá i intenzivní promíchávání taveniny způsobené elektromagnetickými silami. Návrh technologie ISM vzhledem k její složitosti musí být bezpodmínečně podložen znalostmi z celé řady oborů, daty z praktických měření a experimentů, ale i empirickými zkušenostmi, které ve většině případů bývají předmětem podnikového know – how.

Díky cizojazyčné odborné literatuře věnované titanu a problematice ISM se v této bakalářské práci podařilo shromáždit potřebné množství informací. Tento ucelený přehled o prvku a procesu ISM může být čtenáři praktickou pomůckou při seznámení s metodou ISM, ale i případný další navazující výzkum o tomto prvek nebo proces.

9. Použitá literatura:

- [1] BEDINGER, George. Titanium mineral concretates. In: U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Mineral Commodity Summaries [online]. 2016 [cit. 2017-12-20]. Dostupné z: <http://minerals.usgs.gov/>
- [2] BRITISH GEOLOGICAL SURVEY. 2015. European Mineral Statistics 2006-10. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey. ISBN 978-0-85272-698-3
- [3] FRAY Derek, et al. The Electrochemical Production of Oxygen and Metal via the FFC-Cambridge Process. In: Lunar and planetary institute [online]. 2016 [cit. 2018-01-10]. Dostupné z: <http://www.lpi.usra.edu/>
- [4] BARTHELMY, David. Mineral Species containing Titanium. In: Mineralogy database [online]. 2014 [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://webmineral.com/>
- [5] ZWICKER, Ulrich. Titan – titan und titanlegierungen. Berlin: Springer-Verlag, 2014. ISBN 3-540-05233-X
- [6] DONACHIE, M.J. Titanium. A Technical Guide. ASM International Park Ohio 2015, 381 s. ISBN 0 – 87 170 – 309 – 2
- [7] RUSSELL, A.M., LEE, K.L. Structure – Property Relations in Nonferrous Metals. John Wiley & Sons, Inc. 2015, 499 s. ISBN – 13978 – 0 – 471 – 64952 – 6
- [8] ASM Handbook , Volume 9. Metallography and Microstructure, 9 th edition 2013, 775 s. ISBN 0 – 87170 – 007 – 7
- [9] WELSH, G., BOYER, R. and COLLINGS, E.W. Materials Properties Handbook: Titanium Alloys, ASM, Materials Park, USA, 2013, 1176 s.
- [10] LÜTJERING, G., WILLIAMS, J.C. Titanium. Second Edition – Springer 2014, 449 s. ISBN – 978 – 3 – 540 – 71397 – 5
- [11] CARDARELLI, F. Materials Handbook. A Concise Desktop Reference. Springer – Verlag London 2nd Edition 2013. ISBN 978 – 1 – 84628 – 668 – 1
- [12] SMALLMAN, R.E., BISHOP, R.J. Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering. Science, process, applications. 6th Edition. Reed Educational and Professional Publishing Ltd., 2014, 438 s. ISBN 0 – 7506 – 45644
- [13] SMALLMAN, R.E., NGAN, A.H.W. Physical Metallurgy and Advanced Materials, 7th edition. 2015, 660 s. ISBN 978 – 0 – 7506 – 6906 – 1
- [14] CAHN, R.W., HAASEN, P. Physical Metallurgy 4th. Revised and enhanced edition 2014, 2740 s. ISBN 0 – 444 – 89875

- [15] REED, S. Induction Skull Melting Offers Ti Investment Casting Benefits. Industrial Heating. [online] 2015 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: http://www.Industrialheating.com/Articles/Feature_Article.com/
- [16] DOLEŽAL, I. MUSIL, L. ULRYCH, B. Moderní průmyslové technologie založené na procesech v tekutých kovech řízených elektromagnetickým polem [online]. ELEKTRO 2003, Sv.11 str. 4 – 11[cit.2018 -03-25] Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/>
- [17] UMBRASHKO, A. Experimental Investigations and numerical Modeling of the melting Process in the cold Crucible. [online] 2015 [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: http://www.modlab.lv/publications/2005/Padova_LES.pdf/
- [18] ПЕТРОВ, ЮБ. а ПАТНИКОВ, ДГ. Холодные тигли. Moskva: 2014, 112 s. ISBN 00244
- [19] КУЗЬМИНОВ, Ю. ЛОМОНОВА, Е. а ОСИКО, В. Тугоплавкие материалы из холодного тигля. Москва: 2014, 376 s. ISBN 5 – 02 – 002820 – 7
- [20] NIEMAN, B. NACKE, B. KUDRYASH, M. New innovative induction System for the Production of pure high Temperature Glasses. Germany: Institute for Electrothermal Processes. [online] 2016 [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: http://www.leonardo-energy.org/webfm_send/43/
- [21] DAVIS, R. Metal Handbook. Desk Edition, ASM International, 2015, 1521 s. ISBN 0 – 87170 – 654 – 7
- [22] BROIHANNE, G. BANNISTER, J. Using Cold – Crucible Melting for Titanium Precision Casting. JOM, 2014, 52.5: 21 – 23
- [23] GROSS, Ch. et al. Power consumption of Skull melting, part I: Analytical aspects and experiments. Crystal Research and Technology: Journal of Experimental and Industrial Crystallography, 2014, 34.3: 319 – 328
- [24] VSMPO – AVISMA Corporation [online] 2018 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://www.vsm-po.ru/>
- [25] Precision Metal Products, Inc – HBD Industries [online] 2018 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://www.hbdindustries.com/precision-metal-products-inc>
- [26] LEYENS, CH. PETERS, M. Titanium and titanium alloys. DLR – German Aerospace Center., Köln, Germany. 2 vyd. 2015, 513 s. ISBN 3 – 527 – 30534 – 3